

回路振荡热管稳定运行条件及循环特性的热力学分析

苏 磊 张 红

(南京工业大学能源学院, 江苏 南京 210009)

摘 要: 以简单回路振荡热管为热力系统, 通过热力学分析, 导出了稳定循环的条件: 蒸发端吸热量等于冷凝端放热量, 且必须考虑耗散功的影响作用。推导出稳定循环过程的特征和热力学参量变化的规律, 揭示了过程能量转换的特点。结果表明: 吸(放)热过程包括潜热和显热, 汽相比体积随压力的变化因素不可忽视; 蒸汽干度和密度的变化与温度、压力同向, 与流速相反; 此过程中的能量转换是维持能量传递的重要条件。

关键词: 回路振荡热管; 稳定循环; 耗散功; 循环特性

中图分类号: TK172.4

引 言

振荡热管(oscillating heat pipe, OHP)是20世纪90年代初出现的一种新型热管,也是热管家族中最新、最独特的一种热管。其结构小而简单、成本低,传热性能优良。可应用到多个领域,被视为目前解决微小空间高热流密度的散热方案中很有希望和前途的一种传热元件^[1]。回路振荡热管(Looped OHP)的结构是:在封闭的蛇形毛细管路中(一般内径0.5~3 mm)充有一定量的工作介质,介质在冷热端温差和毛细力的作用下形成汽液塞状流,通过相变、汽液塞的振荡循环和热量转化为功实现热量的传递。

振荡热管的显著优点是传热性能很好,适应性强。在合适的充液率下,热流密度可以很大而不被烧干,没有普通热管的传热极限。Nishio^[2]等的实验结果表明:充有50%的R142b,内径0.5 mm的玻璃式振荡热管,在竖直工作时传输的热流密度可达1000 W/cm²,显著高于普通吸液芯热管(50 W/cm²)。回路振荡热管内部运行机理远比普通热管复杂,是涉及多学科,多参数的汽液两相流系统,实验和理论研究都还处于初级阶段。其理论研究主要侧重于单汽液塞传热传质和液膜间作用力^[3]的问

题,以及运用波函数、人工神经网络^[4]等理论研究其物理过程,但都不能很好地揭示其运行机理。文献中很少有运用热力学理论研究其运行现象和机理的报道。

本文运用热力学理论,研究简单回路振荡热管内工质稳定运行的条件,稳定循环过程中热力学参数的变化规律及循环特征,为揭示振荡运行机理提供一定的理论依据。

1 回路振荡热管稳定运行的条件

通过回路振荡热管可视化实验和大量文献^[5-6]证实,输入功率较大时,管内工质呈现单向循环稳定状态。本文以一个简单回路振荡热管(结构图见图1)为研究对象,通过热力学分析得出稳定运行的条件。

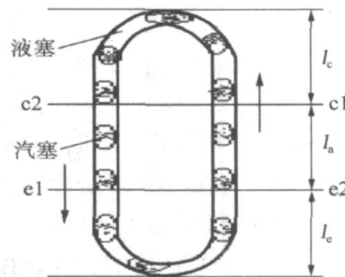


图1 简单回路热管结构图

Fig. 1 Schematic diagram of a single LOHP

图1中,定质量工质在垂直放置的管内进行逆时针循环运动,根据热交换形式,系统分为4部分,加热段e1-e2(蒸发段),放热段c1-c2(冷凝段),绝热段1(e2-c1)和绝热段2(c2-e1)。

收稿日期: 2007-05-17

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金(02KJB470001)

第一作者: 女,1969年生,副教授,在职博士

E-mail: sulei69@sohu.com

此回路热管可看成定质量闭口系统,外界是一个热源和冷源;通过循环运动,工质把从热源吸入的热量传递到冷凝段,并释放给冷源,完成热量的传递;但热管与外界并无功的交换。该闭口系统能量方程如下:

$$E_{ck} = E_{ck,e} + E_{ck,a1} + E_{ck,c} + E_{ck,a2} = Q_e + Q_c \quad (1)$$

管内工质总能方程为:

$$E_{ck} = U + E_k + E_p \quad (2)$$

(1)、(2)两式联立得:

$$E_{ck} = U + E_k + E_p = Q_e + Q_c \quad (3)$$

(3)式表明:回路热管内工质总能的增量为进入系统的能量 Q_e 和离开系统的能量 Q_c 之和。

1.1 管内工质热力状态分析

当 $Q_e + Q_c > 0$ 时, $E_{ck} > 0$, 管内工质总能增加。表现在管内工质的移动、温度升高和工质振荡频率和幅度的增加。此过程主要发生在热管启动和稳定状态前的阶段。

当 $Q_e + Q_c < 0$ 时, $E_{ck} < 0$, 管内工质总能减少,即工质整体温度及脉动速度的降低。其主要发生在工质停止运行阶段。

当 $Q_e + Q_c = 0$ 时, $E_{ck} = 0$, 管内工质总能不变,即工质的温度和运动速度不随时间发生变化,工质处于最佳稳定运行状态,为单向循环流动。

分析表明:热管从启动到稳定运行,管内工质把部分热量转化为动能;达到稳定运行时,热管必须满足能量平衡 $Q_e + Q_c = 0$ 。

1.2 耗散功对脉动热管稳定循环的作用

当工质在管内运动时,由于存在粘性力,粘性力做功会使工质动能减小,内能增加。因此,把粘性力作的功叫耗散功,耗散功转变为耗散热,以热能形式重新回到工质内部。

工质在回路热管内循环一周时,经过4个过程,每一过程的熵变可描述如下:蒸发段吸热 $s > 0$, 冷凝段放热 $s < 0$; 绝热段熵变分为两种情况:考虑耗散功时: $s > 0$, 不考虑耗散功时, $s = 0$ 。图2和图3分别是两种情况下的循环 $T-s$ 图。

() 忽略耗散功的可逆循环过程(图2)

() 考虑耗散功的不可逆循环过程(图3)

通过对图2、3中8条循环曲线分析,发现图2中的4个忽略耗散功的循环曲线均不能满足系统稳定循环的能量方程 $Q_e + Q_c = 0$, 只有图3中考虑耗散功影响的(e)和(f)曲线能满足此条件。由此证

明,回路振荡热管稳定运行时,要满足能量方程,就必须考虑耗散功的影响。

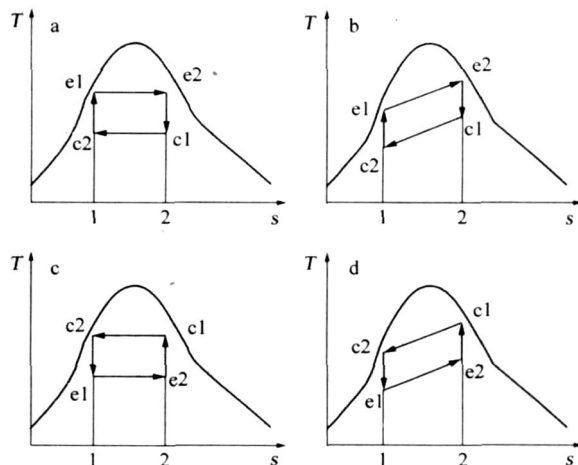


图2 4种可逆循环曲线(忽略耗散力)

Fig. 2 $T-s$ diagrams for four types of reversible cycle

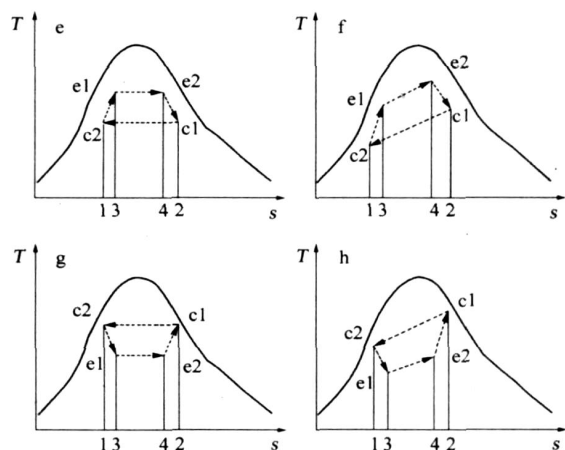


图3 4种不可逆循环曲线(考虑耗散功)

Fig. 3 $T-s$ diagrams for four types of irreversible cycle

2 回路振荡热管稳定循环特性分析

图3中(e)和(f)温-熵图曲线说明,稳定循环时,蒸发端压力和温度必高于冷凝端,但吸放热过程存在两种可能:一种是定压汽化和液化过程;一种是升压汽化和降压液化过程。另外,由于稳定循环曲线只反映了各过程温度和压力的变化趋势,其他过程参数,如:比体积、流速,干度等的变化并不清楚。因此,要准确描述稳定循环时各过程的曲线特征,还必须进行热力学分析。

2.1 稳定循环热力学方程的建立

稳定循环的回路热管,蒸发段、冷凝段和绝热段

可看成是 4 个稳流系统, 过程的质量守恒和功平衡方程如下。

$$\text{质量守恒 } q_{m,e1} = q_{m,e2} = q_{m,c1} = q_{m,c2} \quad (4)$$

功平衡方程

$$\text{蒸发段 } W_e = q_{m,e1} [(p_e v_e) + (e_{k,e2} - e_{k,e1}) + (e_{p,e2} - e_{p,e1})] + W_{1,e} \quad (5)$$

$$\text{绝热段 1 } W_{a1} = q_{m,e2} [(p_{a1} v_{a1}) + (e_{k,c1} - e_{k,e2}) + (e_{p,c1} - e_{p,e2})] + W_{1,a1} \quad (6)$$

$$\text{冷凝段 } W_c = q_{m,c1} [(p_c v_c) + (e_{k,c2} - e_{k,c1}) + (e_{p,c2} - e_{p,c1})] + W_{1,c} \quad (7)$$

$$\text{绝热段 2 } W_{a2} = q_{m,c2} [(p_{a2} v_{a2}) + (e_{k,e1} - e_{k,c2}) + (e_{p,e1} - e_{p,c2})] + W_{1,a2} \quad (8)$$

各段质量和能量方程组简化如下:

$$\begin{aligned} \text{蒸发段 } \frac{c_{f,e1}}{v_{e1}} &= \frac{c_{f,e2}}{v_{e2}}, \quad x_{e2} > x_{e1} \\ c_{f,e1}^2 - c_{f,e2}^2 &= 2 \int_{e_1}^{e_2} v_e dp + w_{1,e} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{冷凝段 } \frac{c_{f,c1}}{v_{c1}} &= \frac{c_{f,c2}}{v_{c2}}, \quad x_{c2} < x_{c1} \\ c_{f,c1}^2 - c_{f,c2}^2 &= 2 \int_{c_1}^{c_2} v_c dp + w_{1,c} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{绝热段 1 } \frac{c_{f,e2}}{v_{e2}} &= \frac{c_{f,c1}}{v_{c1}}, \quad p < 0 \\ c_{f,e2}^2 - c_{f,c1}^2 &= 2 \left(\frac{e_1 - e_2}{v_{a1}} dp + gl_a + w_{1,a1} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{绝热段 2 } \frac{c_{f,c2}}{v_{c2}} &= \frac{c_{f,e1}}{v_{e1}}, \quad p > 0 \\ c_{f,c2}^2 - c_{f,e1}^2 &= 2 \left(\frac{e_1 - e_2}{v_{a2}} dp + gl_a + w_{1,a2} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $v = (1 - x) v + x v$

因稳定循环时, 蒸发段存在定压汽化 $p = 0$ 和升压汽化 $p > 0$ 两种可能, 分别代入蒸发段方程组 (9), 发现 $p = 0$ 方程组不成立; 因此蒸发段的汽化过程必为升压过程, 同时 $c_{f,e2} < c_{f,e1}$, $v_{e2} < v_{e1}$; 同理, 冷凝段必为降压过程, 对应 $c_{f,c2} > c_{f,c1}$, $v_{c2} > v_{c1}$ 。而绝热过程是在汽液两相区, 查 $h-s$ 图可知: $p < 0$ 时, $v > 0$, $x < 0$; $p > 0$ 时, $v < 0$, $x > 0$, 可得: 绝热段 1, $c_{f,c1} > c_{f,e2}$, 绝热段 2 为 $c_{f,e1} < c_{f,c2}$ 。

故稳定循环过程描述如下: 蒸发段为升温升压压缩减速汽化吸热过程; 冷凝段为降压降温膨胀增速冷凝放热过程; 绝热段 1 为降压降温膨胀液化增速绝热过程; 绝热段 2 为升压升温压缩汽化减速不可逆绝热过程。

稳定循环曲线在 $T-s$ 图上可表示成图 3 中的 (f), $p-v$ 图和 $h-s$ 图如图 4。

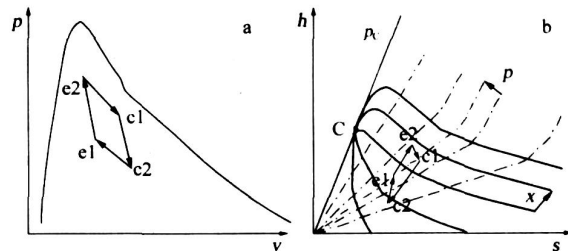


图 4 $p-v$ (a) 和 $h-s$ (b) 循环曲线图

Fig. 4 $p-v$ (a) and $h-s$ (b) diagrams for the stability cycle

2.2 稳定循环特性分析

图 5 中的箭头表示工质的循环方向。图 5 描述了工质沿管循环一周时, 热力学参量随管位置的变化规律。

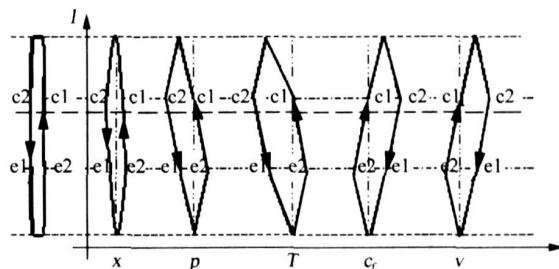


图 5 工质的热力学参量沿管位置的变化示意图

Fig. 5 Variation of thermodynamics parameters with position

图 5 表明: 稳定循环过程中, 温度增加时, 压力、干度也增加, 而流速和比体积则减小, 反之亦然。另外, 简单回路热管的右侧管中工质流入冷凝端, 左侧管中工质流向蒸发端, 且右侧管整体温度、压力、干度和重位压头均大于左侧管, 而流速小于左侧管。相同高度下, 绝热段热力学参数的差值最大, 向管两端靠近, 差值变小。

此结论中温度随管位置的变化规律与徐进良关于脉冲热管脉动现象及实验测量中的温度测试结论吻合。另外, 稳定循环时, 蒸发端的升压汽化和冷凝段的降压液化过程说明, 蒸发端和冷凝端的吸(放)热量既包括相变的潜热部分, 又包括显热部分, 此结论与 Khandekar^[7-8]和曲伟^[9]等文献上的实验数据一致。同时, 蒸发端工质在汽化过程中, 汽液塞的平均比体积没增加, 反而减小, 其主要原因是: 部分动能转化为压力能, 使压力上升, 汽液塞体积被压缩导致的; 另外, 压力升高, 又改变了饱和水和饱和汽的比体积, 其中蒸汽比体积的减小程度大于汽化的体积增量和饱和水比体积增量之和。冷凝段的变化正

与蒸发端相反。

工质在绝热段的升压降压过程是保证蒸发端和冷凝端存在一定温差的重要前提,并为稳定循环过程的进行提供可能。其中绝热段 1 完成了工质焓能向机械能转换的过程,而绝热段 2 完成工质机械能向焓能转换的过程。

总之:工质通过稳定循环过程,从蒸发端吸收热量,在绝热段 1,部分转变为势能和动能,经过冷凝端时,放出热量,增加动能;绝热段 2 把势能和部分动能转化为压力能;通过能量转换维持循环,完成热量的传递。

符 号 说 明

c_f ——流速, m/s

E_k, E_p ——动能, 势能, kJ

E_{ck}, E_k, E_p ——储存能、动能和势能的增量, kJ

e_k, e_p ——单位工质动能和势能, kJ/kg

h ——单位工质焓, kJ/kg

l_a, l_c, l_e ——绝热段、冷凝段、蒸发段的高度, m

p ——压力, Pa

Q_c, Q_e ——冷凝段放热量, 蒸发段吸热量, kJ

q_m ——质量流量, kg/s

s, \bar{s} ——工质熵和熵变, kJ/K·kg

T ——工质温度, K

U, \bar{U} ——热力学能, 热力学能增量, kJ

v, \bar{v} ——比体积, 汽液两相平均比体积, m³/kg

W, W_1 ——体积功, 耗散功, kJ

w, w_1 ——单位工质体积功和耗散功, kJ/kg

x ——干度

下脚标

a_1, a_2 ——绝热段 1, 绝热段 2

c, c_1, c_2 ——冷凝段, 冷凝段进口截面, 冷凝段出口截面

e, e_1, e_2 ——蒸发段, 蒸发段进口截面, 蒸发段出口截面

参考文献:

- [1] 马永锡, 张红, 庄骏. 振荡热管——一种新型独特的传热元件[J]. 化工进展, 2004, 23(9): 1008 - 1012.
- [2] NISHIO S, NAGATA S, KUBOTA T. Study on thermal performance of SEMOS heat pipe[C]. 39th National Heat Transfer Symposium. Japan: Sapporo, 2002.
- [3] 马永锡, 张红, 苏磊. 振荡热管内的振荡及传热传质特性[J]. 化工学报, 2005, 25(12): 2265 - 2270.
- [4] KHANDEKAR S, CUI X, GROLL M. Thermal performance modeling of pulsating heat pipes by artificial neural network[C]. Proc 12th Int Heat Pipe Conf. France: Grenoble, 2002: 215 - 219.
- [5] 曲伟, 马同泽. 脉动热管的工质流动和传热特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 596 - 598.
- [6] 徐进良, 张显明, 施慧烈. 脉冲热管中的热力型脉动现象及实验测量[J]. 自然科学进展, 2004, 4(14): 436 - 441.
- [7] KHANDEKAR S, SCHNEIDER M, SCHAFERE P. Thermofluid dynamic study of flat plate closed loop pulsating heat pipes[J]. Microscale Thermophysical Engineering, 2002, 6(4): 303 - 318.
- [8] KHANDEKAR S, GROLL M. An insight into thermohydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes[J]. Thermal Sciences, 2004, 43(1): 13 - 20.
- [9] 曲伟, 马同泽. 环路型脉动热管的稳态运行机制[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 323 - 325.

Thermodynamics analysis of steady state circulation flow conditions for a loop oscillating heat pipe

SU Lei ZHANG Hong

(School of Energy Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009, China)

Abstract: The characteristics of steady state circulation flow in a single loop oscillating heat pipe have been analyzed from a thermo-mechanical viewpoint. The results show that the heat absorption from the evaporator section must be equal to the heat release from the condenser section and that dissipation work is necessary to maintain stable running. The laws governing the changes in thermodynamics parameters and characteristics of the energy conversion processes involved are derived. It is shown that absorption or discharge of heat, including latent heat and sensible heat, as well as changes of vapor volume ratio with pressure must all be considered. The variation in both dryness fraction of the steam and its density follows that of temperature and pressure, whereas the variation in flow velocity is in the opposite sense. Furthermore, energy conversion is a necessary condition to maintain energy transfer during the circulation.

Key words: loop oscillating heat pipe; steady state circulation flow; dissipation work; circulation characteristic